

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Тольяттинский государственный университет»

Институт машиностроения
(наименование института полностью)

Кафедра «Проектирование и эксплуатация автомобилей»
(наименование)

13.03.03 Энергетическое машиностроение
(код и наименование направления подготовки / специальности)

Проектирование и эксплуатация автомобилей с гибридными силовыми установками
(направленность (профиль) / специализация)

ВЫПУСКНАЯ КВАЛИФИКАЦИОННАЯ РАБОТА (БАКАЛАВРСКАЯ РАБОТА)

на тему Разработка пневматической системы переключения передач гоночного
автомобиля класса “Formula Student

Обучающийся

И.С. Мякишев

(Инициалы Фамилия)

(личная подпись)

Руководитель

канд. техн. наук, доцент А. С. Тизилев

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Консультант

канд. фил. наук, доцент М.М. Бажутина

(ученая степень (при наличии), ученое звание (при наличии), Инициалы Фамилия)

Тольятти 2025

Аннотация

Выпускная квалификационная работа посвящена разработке новой конструкции системы управления трансмиссией автомобиля класса Formula Student. Главной задачей исследования является создание надежной, технологичной и соответствующей регламенту конструкции, которая обеспечит надёжную работу трансмиссии и эргономику пилота при минимальной массе изделия. В работе представлены результаты анализа требований Formula Student Rules 2025, а также конструктивных решений, реализованных в предыдущих версиях болида и в зарубежных командах-участниках. На основании полученных данных разработана новая конструкция, выполнена её трёхмерная модель и проведён конечно-элементный анализ.

Разработанная система позволяет уменьшить и стандартизировать время переключения передач, снизить нагрузку на водителя во время движения и усовершенствовать систему управления автомобилем вплоть до разработки беспилотного автомобиля в будущем. Полученные результаты рекомендованы к использованию в дальнейших итерациях разработки студенческого гоночного автомобиля.

Выпускная квалификационная работа состоит из пояснительной записки в размере 58 страниц, содержащей 16 таблиц, 17 рисунков и графической части, содержащей 6 листов.

Abstract

The final qualification thesis is dedicated to the development of a new transmission control system design for a Formula Student class race car. The primary objective of this study is to create a reliable, manufacturable, and regulation-compliant system that ensures dependable transmission performance and optimal driver ergonomics, while maintaining minimal component weight. The thesis presents an analysis of the Formula Student Rules 2025 requirements, as well as a review of design solutions implemented in previous vehicle iterations and by international competitor teams. Based on this analysis, a new design was developed, a comprehensive 3D model was created, and finite element analysis (FEA) was conducted. The resulting system reduces and standardizes gear shifting time, decreases driver workload during operation, and enhances vehicle control systems — laying the groundwork for future development of an autonomous vehicle. The results of this work are recommended for use in future iterations of the student race car project.

The thesis consists of an explanatory report comprising 58 pages, including 16 tables and 17 figures, as well as a graphic section comprising 6 sheets.

Содержание

Введение.....	5
1 Состояние вопроса	8
1.1 Характеристика соревнований Formula Student.....	8
1.2 Виды коробок передач: типы и функции.....	9
1.3 Системы управления механической и роботизированной трансмиссией гоночных автомобилей других серий: конструкции и особенности	12
2 Исследование вводных данных	17
2.1 Определение конструктивных параметров автомобиля	17
2.2 Выбор наиболее перспективного прототипа.....	37
3 Проектирование и расчет	41
3.1 Определение исходных данных.....	41
3.2 Проектирование конструкции.....	42
Заключение	55
Список используемой литературы и используемых источников.....	57

Введение

Formula Student – это международное инженерное соревнование, цель которого, объединить студентов технических вузов со всего мира в стремлении разработать, произвести и испытать полноценный гоночный автомобиль. Конкуренция, между командами по всему миру, требует не только технических компетенций, но и умения принимать грамотные решения при проектировании, ориентируясь на полученный реальный инженерный опыт, государственные стандарты, регламент и ресурсы команды.

Соревнования Formula Student проводятся с 1981 года, когда в США был впервые проведён студенческий конкурс инженерных команд Formula SAE. Первоначально целью соревнования было обучение студентов навыкам проектного мышления, однако уже в 90-х годах прошлого века движение распространилось за пределы Северной Америки. Первыми Европейскими соревнованиями считаются Formula Student UK, которые прошли на легендарной трассе Сильверстоун. Позже Formula Student получила популярность – в Германии, Италии, Австрии, Венгрии и других странах. В России первые официальные старты прошли в 2012 году, и с тех пор интерес к серии в нашей стране и во всем мире устойчиво растёт.

Современные соревнования включают в себя 3 класса гоночных автомобилей: автомобили с ДВС (CV), с электрической силовой установкой (EV), а также автономные болиды (DV). Помимо динамических дисциплин, команды соревнуются в уровне проектных решений, бизнес-обосновании и конструкторской документации к своим автомобилям. Первостепенное внимание уделяется безопасности водителя, конструкции и жёстким требованиям регламента.

Для правильной работы студенческой команды в рамках разработки гоночного автомобиля и качественного выступления на дисциплине Design Event, автомобиль разделяется на несколько основных систем:

- силовая установка,

- подвеска,
- несущая структура,
- трансмиссия,
- аэродинамика,
- эргономика.

Эргономика является наиболее противоречивой системой для доработки среди команд. Противоречия основаны на увеличении веса конструкции, связанного с изменением расположения органов управления, которые вызваны требованием регламента использовать нескольких пилотов. Основная задача эргономики – улучшить комфорт пилота, снять с него лишние нагрузки и помочь сосредоточиться только на управлении автомобилем. Регламентом соревнований запрещено использовать различные усилители рулевой и тормозной системы, что ограничивает технологии, во имя увеличения безопасности. Одним из активно изменяемых узлов зоны эргономики считается актуатор коробки переключения передач.

Целью данной работы является разработка новой системы переключения передач для автомобиля Formula Student, обеспечивающей повышенную скорость и надежность переключения передачи при минимальной массе, с максимальным комфортом для водителя и учётом всех действующих требований регламента.

Для достижения поставленной цели в работе решаются следующие задачи:

- провести анализ действующего регламента Formula Student 2025 года применительно к пневматическим системам;
- изучить существующие подходы к проектированию систем управления трансмиссией в Российских и зарубежных командах соревнований;
- сформировать исходные проектные данные на основе компоновки болида;

- рассчитать основные характеристики всей системы и отдельных её частей;
- разработать, оптимизировать и интегрировать конструкцию пневматической системы используя САД системы.
- Установить систему на автомобиль, провести калибровку и испытания для успешного участия автомобиля в динамических дисциплинах грядущих соревнований.

Научно-техническая значимость данной работы заключается в попытке разработать собственную систему, ориентируясь на решения других команд с целью снизить нагрузку на пилота во время заездов и повысить ходовые характеристики. Практическая ценность проекта определяется возможностью внедрения разработанной конструкции в состав автомобиля нового сезона Formula Student.

1 Состояние вопроса

1.1 Характеристика соревнований Formula Student

Formula Student – это международные инженерные соревнования, целью которых является реализация теоретических знаний студентов на практике в виде разработки и изготовления полноценного гоночного автомобиля класса Формула. Главной особенностью соревнований является ориентация не только на динамические показатели автомобиля, но и на комплексную инженерную, экономическую и презентационную составляющие проекта.

Соревнования проходят на ежегодной основе в различных странах Европы и мира, включая Германию, Великобританию, Австрию, Венгрию, Нидерланды, Китай, а также Россию. Все этапы подчиняются единому международному техническому регламенту Formula Student Rules, который регулярно обновляется и определяет требования к конструкции, безопасности и процессу оценки.

Участие в Formula Student предполагает прохождение двух больших групп испытаний: статических и динамических.

К статическим дисциплинам относятся: защита инженерного проекта и обоснование технических решений (Engineering Design Event), экономический анализ и модель стоимости серийного производства (Cost and Manufacturing Event), презентация бизнес-идеи с учётом рыночной стратегии (Business Plan Presentation).

Динамическая часть включает в себя: ускорение (Acceleration) – измерение времени разгона; Восьмерка (Skidpad); автокросс (Autocross) – скоростное прохождение трассы с поворотами; заезд на выносливость (Endurance) – гонка на 22 км; оценка эффективности (Efficiency) – расчёт расхода энергии за пройденную дистанцию.

Перед участием в динамических дисциплинах каждый автомобиль проходит техническую инспекцию, включающую проверку жесткости рамы, систем безопасности, тест на шум, тормоза и устойчивость автомобиля.

Соревновательные классы подразделяются на: CV (Combustion Vehicle) – в котором участвуют автомобили с двигателем внутреннего сгорания; EV (Electric Vehicle) – электрические автомобили с системой высоковольтного питания; DV (Driverless Vehicle) – автономные платформы, управляемые системой навигации и сенсорами.

Эргономика автомобиля играет одну из важнейших ролей в реализации проекта, объединяя в себе безопасность водителя и его комфорт внутри автомобиля в жестких рамках регламента стремления команды к облегчению конструкции. Система управления трансмиссией, в свою очередь, отвечает еще и за стабильную работу и своевременное переключение передач, что является большим преимуществом перед трансмиссиями с ручным приводом.

1.2 Виды коробок передач: типы и функции

Трансмиссия автомобиля отвечает за передачу крутящего момента от двигателя на колеса с возможностью мгновенного изменения передаточного соотношения.

Коробки переключения передач автомобиля бывают нескольких основных видов:

Механическая коробка передач – это тип трансмиссии, в котором изменение передаточного числа производится механическим приводом, которым управляет водитель автомобиля. Трансмиссия представляет собой несколько параллельно расположенных валов, соединенных между собой шестеренной передачей. Шестерни в таком типе коробок передач, зачастую, находятся в постоянном зацеплении между собой. Для трансмиссии крутящего момента от шестерен на специальный вал выбора передачи используют специальные муфты, создающие зацепление между валом выбора передачи и

установленной на нем с помощью игольчатых подшипников шестерне. Управление муфтой выбора передачи производится с помощью вилки, приводимой в движение водителем автомобиля посредством механизма выбора передач. Данный вид трансмиссии является наиболее распространенным в автомобилестроении благодаря низкой стоимости производства, легкости обслуживания и высокой надежности. Однако МКПП теряет популярность на рынке из-за дополнительной нагрузки на водителя во время движения. Коробки передач данной конструкции устанавливаются в автомобили бюджетного ценового сегмента, автомобили испытывающие высокие нагрузки в процессе эксплуатации (внедорожники, грузовые тягачи, спортивные автомобили), а также мототехника.

Автоматическая коробка передач – это трансмиссия, в которой управление переключением производится автоматически по средством блока управления. Автоматическая трансмиссия представляет собой несколько последовательно соединенных планетарных редукторов, которые входят в зацепление с помощью пакетов фрикционов, управляемых электронным блоком. Электронный блок анализирует изменение скорости автомобиля, обороты двигателя и усилие на педали газа. Главным преимуществом такого вида трансмиссии является комфорт водителя. Недостатками автоматической коробки передач считаются высокая стоимость, сложность обслуживания и большие по сравнению с МКПП потери мощности. Коробки передач данной конструкции активно ставят на автомобили повышенной комфортности, использующиеся в чертах города и на легком бездорожье.

Роботизированная коробка передач представляет собой механическую КПП, механизмом выбора передач которой управляет электронный блок, подобный блоку управления АКПП. Такой вид трансмиссии имеет большую надежность относительно автоматической коробки передач, сохраняя автоматизацию. Роботизированные коробки передач применяют в автомобилях городского использования, а также в передовых спортивных и гоночных автомобилях

Вариативная коробка передач – это бесступенчатый вид трансмиссии. В отличие от МКПП АКПП и РКПП данный вид коробок передач изменяет передаточное число плавно в процессе движения. Структура вариативной коробки передач представляет собой входной и выходной валы конусной формы, связанные специальным ремнем. В процессе движения ремень вариатора перемещается между двумя конусными валами, что приводит к изменению передаточного числа трансмиссии. Главными преимуществами такой трансмиссии является плавность хода, экономичность и автоматическое управление. Недостатками являются малая надежность агрегата, высокая стоимость обслуживания и повышенный шум при активном ускорении. Вариативные трансмиссии активно устанавливаются в городские автомобили и мототехнику.

Автомобили спортивного назначения, зачастую, используют механический и роботизированный виды коробок передач. Такие коробки имеют более простую структуру, большую надежность и меньшую цену. Такие коробки передач проще ремонтировать.

Так как регламент Formula Student предписывает использование двигателей объемом до 710сс, основным вариантом выбора силовой установки служат двигатели мотоциклов, которые совмещены с коробкой переключения передач в общий корпус. Производители спортивных мотоциклов используют механическую коробку передач последовательного типа. Такой вид коробки переключения передач использует специальный механизм выбора передач, выполненный в виде барабана с вырезанными на нем насечками. Барабан выбора передач управляет вилками переключения, присоединенными к муфтам на вторичном валу КПП. При изменении положения барабана, вилки выбора передач перемещаются и выбирается новая передача. Такой механизм позволяет переключаться либо на одну передачу вверх, либо на одну передачу вниз. Преимуществом такой системы является упрощение процесса поиска передачи в условиях вождения на высокой скорости, а также избежание ситуаций, когда может быть включена неверная передача.

Для передачи крутящего момента от выходного вала коробки передач на колеса автомобиля, команды Formula Student, зачастую, используют цепной привод мотоцикла, при котором задняя звезда может быть присоединена к задней оси напрямую, или используя дифференциал. Альтернативным способом решения проблемы передачи крутящего момента является установка карданной передачи и заднего редуктора, однако, такой способ значительно увеличивает общий вес конструкции, хотя и имеет повышенную надежность.

В контексте студенческого автомобиля трансмиссия должна обеспечивать:

- передачу крутящего момента от двигателя к колесам автомобиля;
- возможность изменения передаточного числа во время движения;
- соответствие установленным правилам безопасности инспекции (защитные экраны, препятствующие соприкосновению деталей конструкции, различного мусора и человеческих рук с движущимися деталями трансмиссии).

1.3 Системы управления механической и роботизированной трансмиссией гоночных автомобилей других серий: конструкции и особенности

Качественное управление трансмиссией гоночного автомобиля является одним из важнейших факторов, требуемых для победы в гоночном соревновании. Точность, скорость и своевременность включения передачи могут сократить конечное время прохождения дистанции на целые секунды. В автомобилях разных гоночных серий применяются различные системы управления трансмиссией, выбор которых зависит от назначения автомобиля, условий эксплуатации и требований безопасности.

Существует четыре основных вида управления коробками передач гоночных автомобилей.

Ручное – использование рычага переключения передач, передающего усилие с помощью кулисы или троса Боудена (рисунок 1). Такая система использует наименьшее количество деталей, но требует актуатор в виде физической силы человека, что дает дополнительную нагрузку и отвлекает водителя от вращения рулевого колеса. Система с тросовым приводом управления коробки передач активно используется на гражданских автомобилях среднего ценового сегмента. Трос Боудена установлен на все предыдущие автомобили Scorpion, однако с переходом на новый двигатель, прилагаемое усилие для смены передачи значительно выросло. Поэтому было принято решение отказаться от троса Боудена в пользу более эргономичной системы.



Рисунок 1 – Трос Боудена.

Гидравлическое – использование гидравлического цилиндра и гидравлической системы высокого давления. Гидравлическая система переключения передач использует актуатор, приводящийся в действие с помощью жидкости под высоким давлением, которое нагнетается с помощью специального насоса. Такая система забирает мощность двигателя на работу

электрического насоса высокого давления, требует дополнительной защиты от внешнего воздействия и имеет высокую стоимость. В противовес недостаткам гидравлическая система имеет огромное усилие на штоке цилиндра при работе. Актуаторы данного типа активно распространены на автомобилях Формулы 1. Для сравнения была выбрана простая сборочная система, состоящая из одного из самых малых гидроцилиндров (рисунок 2), системы гидравлических распределителей и гидравлического насоса.



Рисунок 2 – Гидравлический цилиндр.

Электрическое – использование электрического цилиндра, питающегося от общей сети автомобиля. Преимуществами электрического цилиндра являются активное позиционирование, позволяющее перемещать цилиндр на рассчитанное расстояние, использование только одного типа питания, а также отсутствие различного рода резервуаров и большого количества блоков управления. Электрические цилиндры устанавливаются на дорожные мотоциклы, как упоры багажника премиальных автомобилей, а также на гоночные автомобили классов WRC, TCR, GT4. В условиях Formula Student существует готовое решение для управления коробкой передач, разработанное для спортивных катков класса KZ1. Flatshifter Max (рисунок 3) представляет

собой комплекс, состоящий из электрического соленоида, клавиш управления и специальным блоком управления двигателем.



Рисунок 3 – Flatshifter Max.

Пневматическое – использование пневматического цилиндра и системы, работающей на сжатом воздухе. Пневматическая система управления (рисунок 4) использует для работы сжатый воздух под давлением. Давление в системе может быть создано либо компрессором, либо заранее заряженным баллоном высокого давления, что позволяет обеспечить работоспособность, с меньшим нагружением шасси. Пневматические системы используются в грузовых автомобилях, пассажирских автобусах и военной технике. Основными преимуществами пневматической системы являются безопасность, простота конструкции, надежность и высокий уровень прикладываемой силы. Минусами системы можно считать большое число модулей, высокий уровень шума и наличие двух систем питания. Для сравнительного анализа была разработана сборная система с использованием

подходящего пневматического цилиндра, системы управления воздухом в виде блока распределителей и специального баллона высокого давления, применяемого в пейнтболе и страйкболе для питания пневматических игровых образцов оружия.

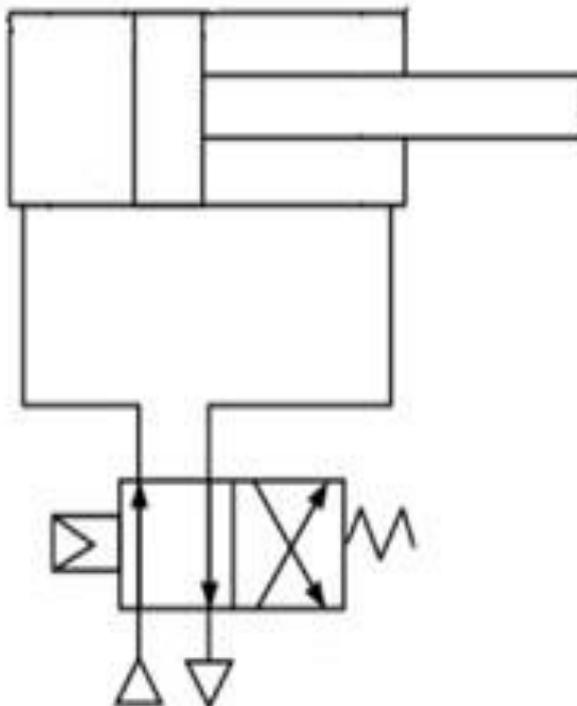


Рисунок 4 – Пневматическая схема.

Выводы по разделу

В ходе анализа состояния вопроса установлено, что современная инженерная практика в Formula Student требует строгого соответствия регламентам, высокой точности проектных решений и глубокого понимания конструктивных особенностей трансмиссии автомобиля. Были изучены типы конструкций, проведён обзор существующих решений, что позволило выявить сильные и слабые стороны различных конструктивных подходов.

2 Исследование вводных данных

2.1 Определение конструктивных параметров автомобиля

Проектирование трансмиссии автомобиля начинается с определения ключевых габаритных, компоновочных и конструктивных параметров, а также анализа требований регламента и текущих инженерных задач. Принятые решения напрямую влияют на выбор передаточного числа трансмиссии и способа управления.

Габаритные и конструктивные параметры автомобиля:

- передняя колея – 1200 мм;
- задняя колея – 1170 мм;
- колёсная база – 1540 мм;
- масса (без пилота) – около 220 кг;
- габаритная ширина – 1444 мм;
- габаритная высота – 1136 мм;
- распределение массы по осям – 40% (перед), 60% (зад);
- пиковая мощность двигателя – 30 кВт (40,7 Л.С.);
- пиковый крутящий момент двигателя – 40 Н*м;
- усилие на рычаге переключения передач – 120 Н;
- линейный ход рычага переключения передач (из нейтрального в конечное положение) – 10 мм.

Указанные значения подобраны с целью достижения стабильного поведения автомобиля в условиях разгона, поворота и торможения, а также соответствия допустимым габаритам по регламенту.

Также требуется произвести тягово-динамический расчет.

2.2 Тягово-динамический расчет автомобиля

«Для расчёта тягово-динамических характеристик болида класса Formula Student исходные данные выведены в таблицу 1. При этом применялась методика, сходная с той, что используется в пособии.

Таблица 1 – Исходные данные для проведения тягово-динамического расчета

Параметры	Значение
Колесная формула	4x2
Количество мест	1
Снаряженная масса m_0 , кг	228,5
Максимальная скорость V_{max} , км/ч (м/с)	80(22.2)
Угловая скорость ω_{max} , рад/с (об/мин)	1047 (10000)
P_{max} Максимальная мощность двигателя N_e , кВт	29,80
M_{max} Максимальный крутящий момент двигателя M_e , Н·м	38,34
Тип и размерность колеса	20,0/7,5 R13
Коэффициент аэродинамического сопротивления C_x	0,43
Величина максимального преодолеваемого уклона i , %	0,34
КПД трансмиссии $\eta_{тр}$	0,93
Габаритная ширина автомобиля B , мм	1,411
Габаритная высота автомобиля H , мм	1,184
Коэффициент сопротивления качению f_0	0,02
Передаточные числа:	
Главной передачи U_0	2,45

Исходные данные необходимы для расчёта параметров транспортного средства и определения его способности двигаться и преодолевать различные сопротивления в различных условиях эксплуатации.

2.2 Тягово-динамический расчет

Полная масса автомобиля рассчитывается по формуле 1.

$$m_a = m_0 + m_{ч} \cdot n + m_б \cdot n, \quad (1)$$

Где: m_0 – снаряженная масса болида, кг;

$m_{ч}$ – масса одного человека, кг; $m_{ч} = 75$ кг;

n – число пассажиров;

$m_б$ – вес багажа, кг.

$$m_a = 228,5 + 65 \cdot 1 = 293,5 \text{ кг}$$

Полный вес автомобиля рассчитывается по формуле 2:

$$G_a = m_a \cdot g, \quad (2)$$

где g – ускорение свободного падения, м/с².

m_a – полная масса автомобиля;

$$G_a = 293,5 \cdot 9,81 = 2\,879,24 \text{ Н}$$

Автомобиль имеет заднеприводную компоновку, принимаем распределение веса по осям в соотношении: 48% на передние колеса и 52% - на задние колеса.

Вес, приходящийся на ведущие колеса:

$$G_2 = 0,52 \cdot G_a = 0,52 \cdot 2\,879,24 = 1\,497,24 \text{ Н}$$

Вес, приходящийся на ведомые колеса:

$$G_1 = 0,48 \cdot G_a = 0,48 \cdot 2\,879,24 = 1\,382 \text{ Н}$$

Параметры обтекаемости автомобиля» [3].

Коэффициент обтекаемости автомобиля рассчитывается по формуле 3:

$$k = \frac{c_x \cdot \rho}{2}, \quad (3)$$

Где: $\rho = 1,293$ – плотность воздуха в нормальных условиях, кг/м³;

$C_x = 0,43$ – Коэффициент аэродинамического сопротивления.

$$k = \frac{0,43 \cdot 1,293}{2} = 0,278$$

Лобовая площадь автомобиля рассчитывается по формуле 4:

$$F = 0,8 \cdot B \cdot H, \quad (4)$$

где B – габаритная ширина мотоцикла, м;

H – габаритная высота мотоцикла, м.

$$F = 0,8 \cdot 1,411 \cdot 1,184 = 1,337 \text{ м}^2$$

«Согласно выбранной ширине 20,0/7,5 R13, радиус качения данной шины рассчитывается по формуле 5:

$$r_k = 0,5 \cdot d + \lambda_z \cdot H, \quad (5)$$

Где: $d = 0.33$ – посадочный диаметр шины, м;

$\lambda_z = 0,85$ – коэффициент вертикальной деформации;

$H = 0.089$ – высота профиля шины, м» [19].

$$r_k = 0.5 \cdot 0,33 + 0,85 \cdot 0,089 = 0,241 \text{ м}$$

Внешняя скоростная характеристика (ВСХ) двигателя

«ВСХ двигателя рассчитывается по формуле 6:

$$N_e = N_{\max} \left[\frac{\omega_e}{\omega_N} + \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^2 - \left(\frac{\omega_e}{\omega_N} \right)^3 \right], \quad (6)$$

Где: ω_e – текущее значение угловой скорости вала, рад/с;

ω_N – угловая скорость вала при максимальной мощности, рад/с.;

N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, Вт.

Для построения кривой эффективного момента M_e (Н · м) применяем формулу 7:

$$M_e = \frac{N_e}{\omega_e}, \quad (7)$$

Где: ω_e – текущее значение угловой скорости вала, рад/с;

ω_N – угловая скорость вала при максимальной мощности, рад/с.;

N_e – текущее значение эффективной мощности двигателя, Вт.

Рассчитываем зависимости $N_e(\omega_e)$ и $M_e(\omega_e)$. Результаты данных полученные со стенда испытаний для двигателя КТМ 390 Adventure сводим в таблицу 2 и представляем в виде графика, на рисунке 5, 6. Для двигателя КТМ 390 adventure, данные полученные со стенда при испытании, которые вы можете увидеть в таблице 2.

Таблица 2 – Результаты со стенда испытания двигателя

$M_e, \text{Н} \cdot \text{м}$	$n_e, \text{об/мин}$	$N_e, \text{кВт}$
27,43	2000	5,74
30,33	3000	9,53
33,03	4000	13,83
31,97	5000	16,74
36,38	6000	22,86
38,34	7000	28,11
35,06	8000	29,37
31,62	9000	29,80
25,67	10000	26,88



Рисунок 5 – График зависимости крутящего момента от частоты вращения с испытаний



Рисунок 6 – График зависимости мощности от частоты вращения с испытаний

Определение передаточного числа

При расчёте передаточного числа главной передачи для автомобиля, оснащённого двигателем на базе КТМ 390, исходят из целевой максимальной скорости и диапазона оборотов, в котором двигатель развивает максимальный крутящий момент и мощность. В условиях гоночной трассы выделяют три ключевые зоны движения: стартовая (для быстрого разгона с места), средняя (для набора скорости и обгонов), и высокоскоростная (для достижения предельной скорости на прямых участках). С учётом того, что силовая установка основана на серийном двигателе с многоступенчатой коробкой передач, подбираются оптимальные передаточные числа главной пары и ступеней трансмиссии. Целью является обеспечение работы двигателя в диапазоне, близком к его максимальной эффективности (пиковым значениям мощности и крутящего момента) в каждом из режимов движения. Такой подход позволяет обеспечить как динамичные старты, так и стабильное ускорение на разных типах покрытия, что критически важно для результативного выступления на соревнованиях Formula Student, где баланс между ускорением, управляемостью и эффективностью передачи мощности напрямую влияет на итоговое время круга» [2].

Расчет производится по данной формуле 8:

$$U_0 = \frac{r_k \cdot \omega_{\max}}{U_4 \cdot v_{\max} \cdot U_0}, \quad (8)$$

$$U_0 = \frac{0,241 \cdot 1047,2}{1 \cdot 40,57 \cdot 2,45} = 2,82$$

Силовой баланс прототипа

Уравнение силового баланса рассчитывается по формуле 9:

$$F_T = F_d + F_B + F_{и}, \quad (9)$$

где F_T – сила тяги ведущих колес, Н;
 F_D – сила дорожного сопротивления, Н;
 F_B – сила сопротивления воздуха, Н;
 $F_{\text{и}}$ – сила сопротивления разгону, Н (не учитываем).

Силу тяги рассчитывают по формуле 10:

$$F_{Ti} = \frac{U_{ki} \cdot U_0 \cdot M_B - \eta_{Tp}}{r_k}, \quad (10)$$

Сила аэродинамического сопротивления воздуха рассчитывается по формуле 11:

$$F_B = k \cdot F \cdot V_a^2, \quad (11)$$

Сила дорожного сопротивления автомобиля (без учета сопротивления подъему) рассчитывается по формуле 12:

$$F_D = G_a \cdot f, \quad (12)$$

где $f = f_0 \cdot \left(1 + \frac{V_a^2}{200}\right)$ – зависимость коэффициента трения качения от скорости движения электромотоцикла.

«Пользуемся выбранными при расчете ВСХ значениями ω_e , приводя в соответствие с ними передачи автомобиля. Результаты занесем в таблицу 3 и составим график, изобразив его на рисунок 6.

Таблица 3 – Силовой баланс автомобиля

	ωе	209,45	314,2	418,9	523,6	628,3	733	837,8	942,5
	Ме	27,4	30,33	33	32	36,4	38,3	35	32
1 передача	V	2,83	4,25	5,66	7,08	8,50	9,91	11,33	12,74
	Ft	1886,6	2086,2	2271,8	2199	2502,1	2637,3	2411,6	2174,8
	Fд	57,82	58,1	58,51	59,03	59,66	60,41	61,28	62,26
	Fв	2,15	4,83	8,58	13,41	19,31	26,29	34,33	43,45
	f	0,02	0,0202	0,0203	0,0205	0,0207	0,021	0,0213	0,0216
2 передача	V	3,87	5,80	7,74	9,67	11,61	13,54	15,47	17,41
	Ft	1381,0	1527,1	1663	1609,74	1832	1930,59	1765,4	1592
	Fд	58,02	58,55	59,31	60,28	61,46	62,86	64,48	66,31
	Fв	4,00	9,01	16,02	25,03	36,04	49,05	64,07	81,09
	f	0,0202	0,0203	0,0206	0,02094	0,0213	0,021833	0,0224	0,0230
3 передача	V	4,94	7,41	9,88	12,35	14,82	17,29	19,76	22,23
	Ft	1081,2	1195,6	1302	1260	1434	1512	1382	1246
	Fд	58,29	59,17	60,40	61,98	63,91	66,20	68,83	71,82
	Fв	6,53	14,70	26,13	40,83	58,8	80,03	104,53	132,29
	f	0,02	0,02	0,02	0,0215	0,022	0,0229	0,024	0,025
4 передача	V	6,16	9,24	12,32	15,40	18,48	21,56	24,65	27,73
	Ft	867	959	1045	1011	1150	1212,1	1108,4	999,5
	Fд	58,68	60,04	61,96	64,42	67,42	70,97	75,07	79,72
	Fв	10,16	22,86	40,63	63,49	91,42	124,44	162,53	205,71
	f	0,0204	0,0208	0,0215	0,0223	0,0234	0,0247	0,026	0,0277
5 передача	V	6,98	10,47	13,96	17,45	20,93	24,42	27,91	31,40
	Ft	765,6	846,6	921,9	892,4	1015,4	1070,2	978,6	882,5
	Fд	58,99	60,74	63,19	66,35	70,20	74,76	80,02	85,98
	Fв	13,03	29,32	52,12	81,44	117,27	159,62	208,49	263,86
	f	0,0205	0,021	0,022	0,023	0,0244	0,026	0,0278	0,0299
6 передача	V	9,02	13,52	18,03	22,54	27,05	31,55	36,06	40,57
	Ft	592,6	655,3	713,6	690,7	785,9	828,4	757,5	683,1
	Fд	59,92	62,85	66,95	72,21	78,65	86,25	95,03	104,97
	Fв	21,75	48,93	86,99	135,93	195,74	266,42	347,98	440,41
	f	0,0208	0,022	0,0233	0,025	0,0273	0,023	0,033	0,0365

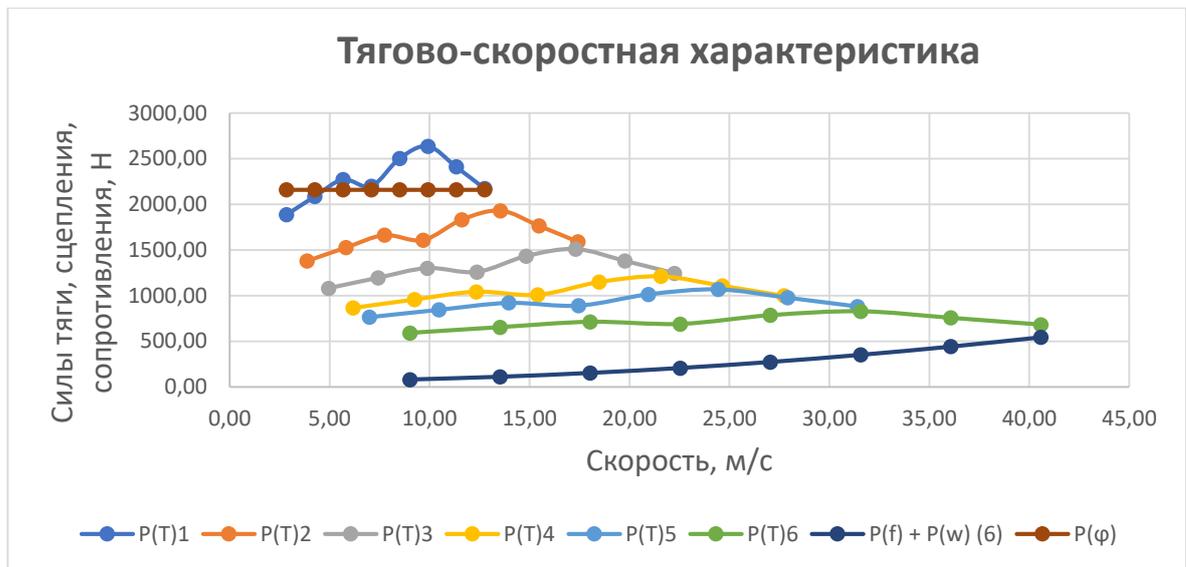


Рисунок 6 – Тягово-скоростная характеристика болида

Динамическая характеристика автомобиля

При помощи формулы 13 и данным силового баланса рассчитываем и строим динамическую характеристику автомобиля, которая является графическим изображением зависимости динамического фактора D от скорости движения при полной нагрузке.

$$D = \frac{F_T - F_B}{G_a}, \quad (13)$$

Для того, чтобы учесть влияние буксования ведущего колеса необходимо определить динамический фактор по сцеплению.

$$D_{сц} \approx \frac{G_{сц} \cdot \varphi}{G_a} = \frac{1\,497,24 \cdot 1,5}{2\,879,24} = 0,78$$

Данные расчета заносим в таблицу 4 и представляем графически на рисунке 7.

Таблица 4 – Данные расчета динамической характеристики

Динамическая характеристика автомобиля						
n, об/мин	1	2	3	4	5	6
2000	0,65	0,48	0,37	0,30	0,26	0,2
3000	0,72	0,53	0,41	0,33	0,28	0,21
4000	0,79	0,57	0,44	0,35	0,30	0,22
5000	0,76	0,55	0,42	0,33	0,28	0,19
6000	0,86	0,62	0,48	0,37	0,31	0,20
7000	0,91	0,65	0,5	0,38	0,32	0,20
8000	0,83	0,59	0,44	0,33	0,27	0,14
9000	0,74	0,52	0,39	0,28	0,21	0,08

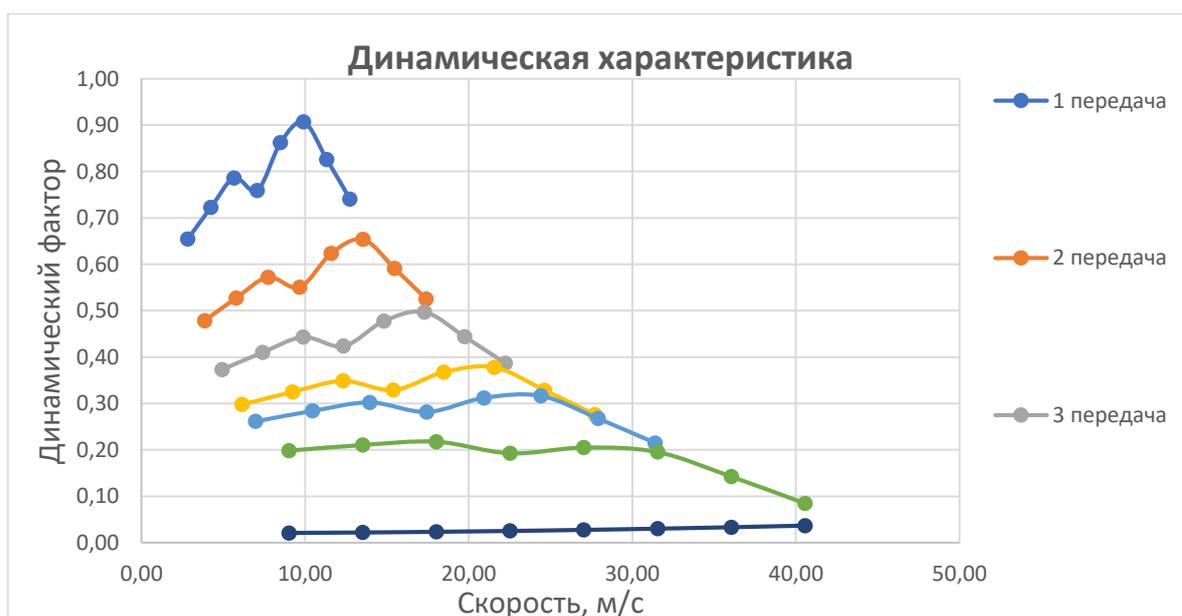


Рисунок 7 – Динамическая характеристика автомобиля Разгон автомобиля

«Разгон автомобиля»

Ускорение во время разгона определяем для случая движения болида по горизонтальной дороге с твердым покрытием хорошего качества при максимальном использовании мощности двигателя и отсутствии буксования ведущих колес. Ускорение определяется по формуле 14

$$j = \frac{(D - f) \cdot g}{\delta_{вр}}, \quad (14)$$

где $\delta_{вр} = 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_k^2)$ – коэффициент учета вращающихся масс двигателя, который определяем для каждой передачи в отдельности по формулам:

$$\begin{aligned} \delta_{вр_1} &= 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_1^2) = 1 + 0,018 + 0,05 \cdot 2,5714^2 = 1,35 \\ \delta_{вр_2} &= 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_2^2) = 1 + 0,018 + 0,05 \cdot 1,8824^2 = 1,1952 \\ \delta_{вр_3} &= 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_3^2) = 1 + 0,018 + 0,05 \cdot 1,4737^2 = 1,1266 \\ \delta_{вр_4} &= 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_4^2) = 1 + 0,018 + 0,05 \cdot 1,1818^2 = 1,0878 \\ \delta_{вр_5} &= 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_5^2) = 1 + 0,018 + 0,05 \cdot 1,0435^2 = 1,0725 \\ \delta_{вр_6} &= 1 + (\delta_1 + \delta_2 \cdot U_6^2) = 1 + 0,018 + 0,05 \cdot 0,8077^2 = 1,0506 \end{aligned}$$

Определяем ускорение разгона, вносим результаты в таблицу 5 и строим график зависимости $j = f(V)$, представленный на рисунке 8» [8].

Таблица 5 – Значения ускорение разгона

Передача	Ускорение мотоцикла j , м/с ²							
	1	2,39	2,64	2,88	2,78	3,17	3,33	3,03
2	1,72	1,91	2,07	1,99	2,27	2,38	2,14	1,89
3	1,33	1,47	1,59	1,51	1,71	1,78	1,58	1,36
4	1,04	1,14	1,23	1,15	1,29	1,33	1,14	0,93
5	0,91	0,99	1,05	0,97	1,08	1,09	0,90	0,70
6	0,67	0,71	0,73	0,63	0,67	0,62	0,41	0,18

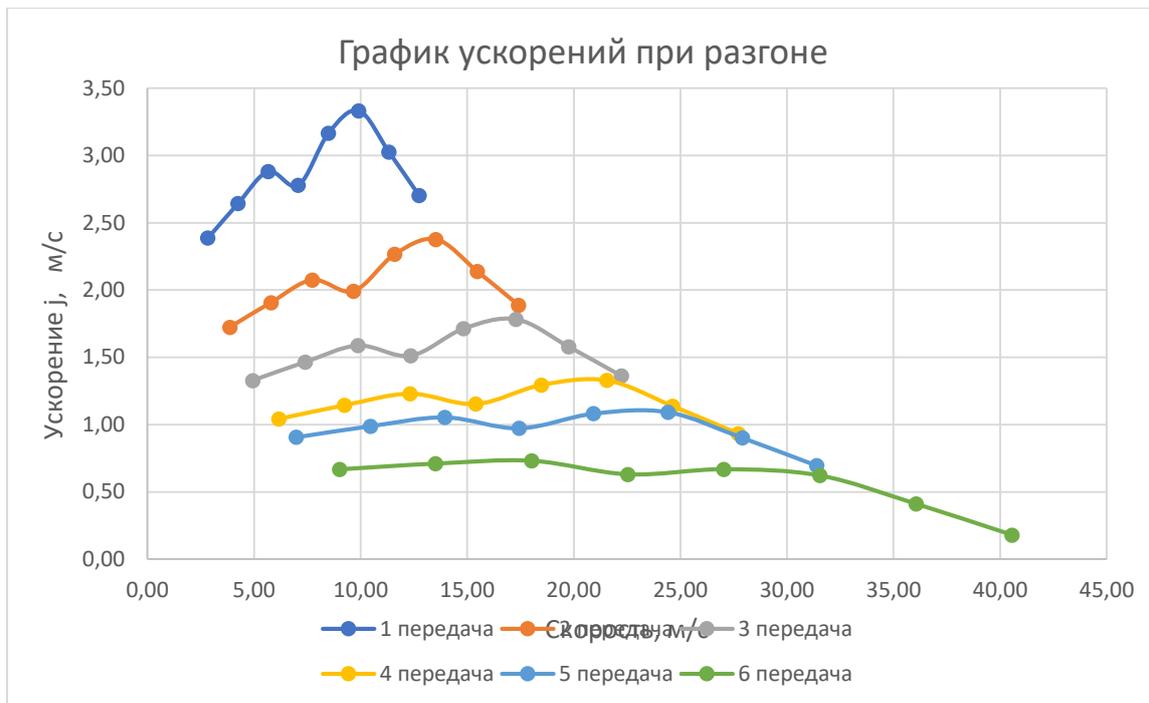


Рисунок 8 – Ускорение автомобиля

После чего определяем значения обратных ускорений ($1/j$), представленные на рисунке 9 и заносим их в таблицу 6. «Поскольку при скоростях V , близких к максимальной, ускорение стремится к нулю, то для расчета обратных ускорений ограничиваются скоростью $V = (0,8 \dots 0,92) V_{\max}$.

Таблица 6 – Значения обратных ускорений

Передача	Обратные ускорения $1/j$, c^2/m							
	0,42	0,38	0,35	0,36	0,32	0,30	0,33	0,37
1	0,42	0,38	0,35	0,36	0,32	0,30	0,33	0,37
2	0,58	0,52	0,48	0,5	0,44	0,42	0,47	0,53
3	0,75	0,68	0,63	0,66	0,58	0,56	0,63	0,73
4	0,96	0,87	0,81	0,87	0,77	0,75	0,88	1,07
5	1,1	1,01	0,95	10,3	0,92	0,92	1,11	1,44
6	1,5	1,41	1,37	1,59	1,5	1,61	2,43	5,56

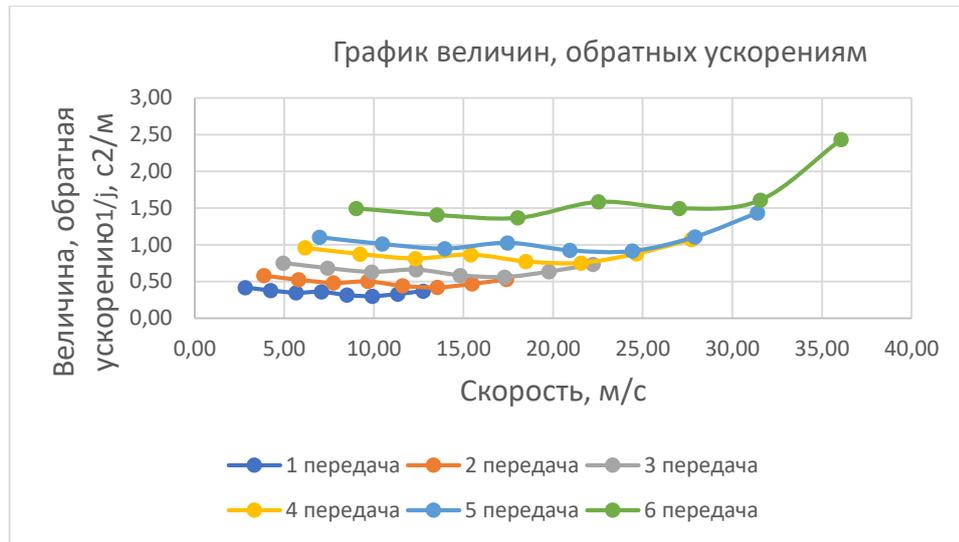


Рисунок 9 – График обратных ускорений

Время и путь разгона

«Время и путь разгона автомобиля определяем графоаналитическим способом. Смысл этого способа в замене интегрирования суммой конечных величин, рассчитываем по формуле 16:

$$\Delta t = \int_{V_i}^{V_{i+1}} \frac{1}{j} dV = \left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_{i+1} \cdot (V_{i+1} - V_i), \quad (16)$$

Для этого кривую обратных ускорений разбивают на интервалы и считают, что в каждом интервале автомобиль разгоняется с постоянным ускорением $j = \text{const}$, которому соответствуют значения $(1/j) = \text{const}$.

Эти величины можно определить следующим образом, используя формулу 17:

$$\left(\frac{1}{j_{CP}} \right)_k = \frac{(1/j)_{k-1} + (1/j)_k}{2}, \quad (17)$$

где k – порядковый номер интервала.

Заменяя точное значение площади под кривой $(1/j)$ в интервале ΔV_k на значение площади прямоугольника со сторонами ΔV_k и $\left(\frac{1}{j_{CP}}\right)_k$, переходим к приближенному интегрированию, применяем формулу 18:

$$\Delta t = \left(\frac{1}{j_{CP}}\right)_k \cdot (V_k - V_{k-1}), \quad (18)$$

$$t_1 = \Delta t_1, \quad t_2 = \Delta t_1 + \Delta t_2, \quad t_n = \sum_{k=1}^n \Delta t_k,$$

Где: t_1 – время разгона от скорости V_0 до скорости V_1 ;

t_2 – время разгона до скорости V_2 .

Результаты расчета сводим в таблицу 7 и представляем в виде графика, представленный на рисунке 10» [3].

Таблица 7 – Значение скорости и времени

$v_a, \text{ м/с}$	$t, \text{ с}$
0	0
2,83	1,186
4,25	0,564
5,66	0,514
7,08	0,501
8,50	0,478
9,91	0,436
11,33	0,446
12,74	0,496
13,54	0,315
15,47	0,859
17,41	0,965
19,76	1,370
22,23	1,689

«Аналогичным образом проводится графическое интегрирование зависимости $t=f(V)$ для получения зависимости пути разгона S от скорости транспорта.

В данном случае кривая $t=f(V)$ разбивается на интервалы по времени, для каждого из которых находится соответствующие значения $V_{срк}$.



Рисунок 10 – Время разгона прототипа

Площадь элементарного прямоугольника в интервале Δt_k есть путь, который проходит прототип от отметки $t_k - 1$ до отметки t_k , двигаясь с постоянной скорости $V_{срк}$ » [32].

«Величина площади элементарного прямоугольника определяется следующим образом, используя формулу 19:

$$\Delta S = V_{срк} \cdot 1 - (t_k - t_{k-1}) = V_{срк} \cdot \Delta t_k, \quad (19)$$

где $k=1\dots m$ – порядковый номер интервала, m выбирается произвольно ($m=n$).

Путь разгона от скорости V_0 до скорости V_1 : $S_1 = \Delta S_1$, до скорости V_2 : $S_2 = \Delta S_1 + \Delta S_1$, до скорости V_n : $S_n = \sum_{k=1}^m \Delta S_k \gg [19]$.

Все результаты расчета заносим в таблицу 8, также представляем все в виде графика, рисунок 11.

Таблица 8 – Значение пути и скорости разгона

v_a , м/с	S, м
0	0
2,83	1,68
4,25	3,68
5,66	6,22
7,08	9,41
8,50	13,14
9,91	17,15
11,33	21,89
12,74	27,86
13,54	32,00
15,47	44,46
17,41	60,32
19,76	85,79
22,23	121,26



Рисунок 12 – Путь разгона прототипа

Мощностной баланс автомобиля

Уравнение мощностного баланса рассчитывается по формуле 20:

$$N_T = N_e - N_{тр} = N_f + N_n + N_B + N_d, \quad (20)$$

где N_T – тяговая мощность, подводимая к ведущим колесам, Вт.

$$N_T = N_e \cdot \eta_{тр} = N_e \cdot 0,93;$$

где $N_{тр}$ – мощность, теряемая в агрегатах трансмиссии, Вт;

$N_T = F_T \cdot V$ – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления подъему, Вт;

$N_B = F_B \cdot V$ – мощность, затраченная на преодоление сил сопротивления воздуха, Вт;

$N_d = F_d \cdot V$ – мощность, затраченная на преодоление силы инерции прототипа Вт.

«Для выбранных ранее интервалов по угловой скорости коленвала двигателя и скорости автомобиля необходимо построить значения мощностного баланса, при этом заполняем таблицу 9 и строим график, рисунок 13. Вверх от кривой N_T откладываем значения мощности сопротивления воздуха N_B » [15].

Таблица 9 – Значения мощностного баланса.

не, рад/с		2000	3000	4000	5000	6000	7000	8000	9000
N, кВт		0	9,53	13,83	16,74	22,86	28,11	29,37	29,80
1 передача	V, м/с	2,83	4,25	5,66	7,08	8,50	9,91	11,33	12,74
	N _т , кВт	5,34	8,86	12,86	15,57	21,26	26,14	27,32	27,71
	N _д , кВт	0,163	0,25	0,33	0,42	0,5	0,6	0,69	0,79
	N _в , кВт	0,006	0,020	0,048	0,094	0,16	0,26	0,39	0,55
2 передача	V, м/с	3,87	5,80	7,74	9,67	11,61	13,54	15,47	17,41
	N _т , кВт	5,34	8,86	12,86	15,57	21,26	26,14	27,32	27,71
	N _д , кВт	0,22	0,34	0,46	0,59	0,72	0,856	0,997	1,155
	N _в , кВт	0,015	0,052	0,123	0,242	0,418	0,664	0,991	1,411
3 передача	V, м/с	4,94	7,41	9,88	12,35	14,82	17,29	19,76	22,23
	N _т , кВт	5,34	8,86	12,86	15,57	21,26	26,14	27,32	27,71
	N _д , кВт	0,288	0,438	0,596	0,765	0,947	1,144	1,360	1,596
	N _в , кВт	0,032	0,108	0,258	0,504	0,871	1,383	2,065	2,940
4 передача	V, м/с	6,16	9,24	12,32	15,40	18,48	21,56	24,65	27,73
	N _т , кВт	5,34	8,86	12,86	15,57	21,26	26,14	27,32	27,71
	N _д , кВт	0,361	0,554	0,763	0,992	1,246	1,530	1,850	2,210
	N _в , кВт	0,062	0,21	0,500	0,977	1,689	2,682	4,006	5,704
5 передача	V, м/с	6,98	10,47	13,96	17,45	20,93	24,42	27,91	31,40
	N _т , кВт	5,34	8,86	12,86	15,57	21,26	26,14	27,32	27,71
	N _д , кВт	0,411	0,635	0,882	1,157	1,469	1,825	2,233	2,699
	N _в , кВт	0,091	0,307	0,727	1,421	2,454	3,897	5,818	8,285
6 передача	V, м/с	9,02	13,52	18,03	22,54	27,05	31,55	36,06	40,57
	N _т , кВт	5,34	8,86	12,86	15,57	21,26	26,14	27,32	27,71
	N _д , кВт	0,54	0,849	1,207	1,627	2,127	2,721	3,426	4,258
	N _в , кВт	0,2	0,66	1,57	3,06	5,3	8,4	12,5	17,86

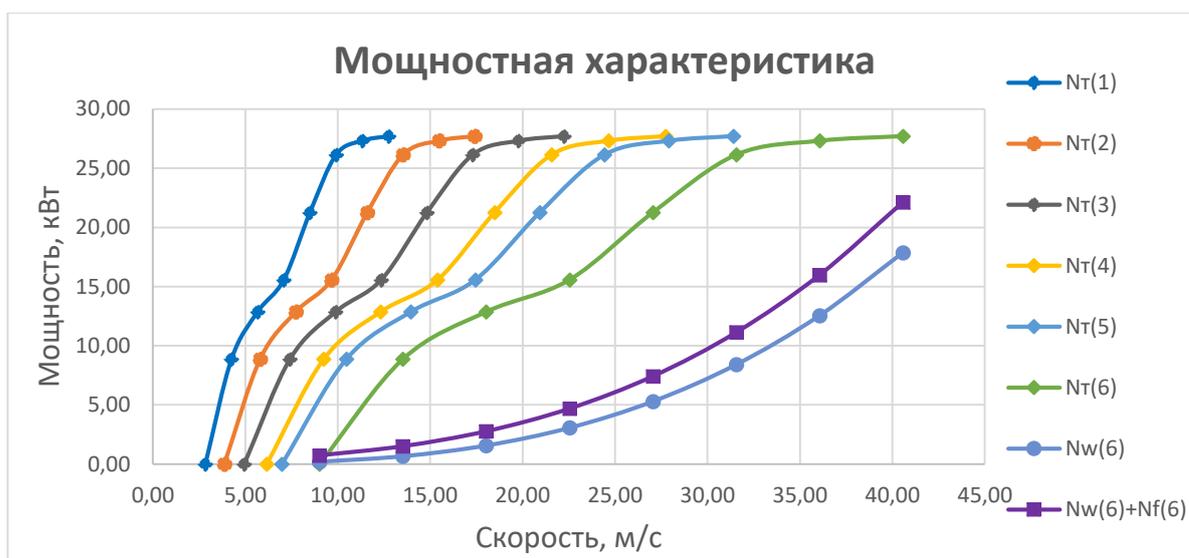


Рисунок 13 – Мощностной баланс автомобиля

Выводы по разделу

В данном разделе был выполнен тягово-динамический расчёт, позволивший определить оптимальное передаточное отношение главной передачи трансмиссии для оптимального ускорения автомобиля в рамках динамических дисциплин. В процессе расчёта были построены графики ускорения, скорости, мощностного баланса и обратного ускорения, отражающие динамические характеристики транспортного средства на различных режимах движения. Анализ полученных зависимостей позволил выявить области, в которых возникают недостатки в тяговых качествах или, наоборот, имеются резервы по мощности и ускорению. Это, в свою очередь, создаёт основу для последующей модификации конструкции автомобиля и разрабатываемой системы переключения передач.

Проведённые расчёты также позволяют предварительно оценить расход энергии, динамическую стабильность и адаптивность транспортного средства к условиям соревнований включая частые разгоны и торможения. Таким образом, тягово-динамический анализ служит неотъемлемым этапом в проектировании и оптимизации транспорта, обеспечивая обоснованный подход к выбору технических решений.

2.2 Выбор наиболее перспективного прототипа.

Существуют два основных используемых метода выбора прототипа: графический метод, который основывается на замерах площади диаграмм отдельно каждого оборудования и экспертный метод, учитывающий значимость каждой характеристики. Идеальным вариантом является лидерство оборудования по результатам анализа каждым из вышеперечисленных методов. В противном случае возможен дополнительный анализ по ранее не учитываемым характеристикам.

Первым шагом для сравнения предложенных систем является сбор основных характеристик в таблицу. В условиях разработки гоночного автомобиля студенческой командой основополагающими характеристиками для сравнения являются доступность решения на рынке, цена, общая масса оборудования и осуществимость технологии при технических условиях команды и регламента соревнований.

Выбранные характеристики и их данные для каждой отдельной системы собраны в Таблице 10.

Таблица 10 - Характеристики сравнения систем

	Механическая система	Гидравлическая система	Электрическая система	Пневматическая система
Стоимость Тыс. Руб.	3	200	100	60
Прилагаемое усилие Н.	30	300	200	240
Время переключения. С.	0,7	0,2	0,5	0,3
Максимальный ход Мм.	30	30	100	25
Масса в сборе Кг.	1,5	6	2,5	2,5
Легкость реализации. (условно по 10 шкале)	8	1	5	3

«Достоверная оценка качества технологического оборудования может быть произведена только при учете всех групп показателей качества, что требует определенной формализации процесса оценки. Если единичные показатели качества P_i могут быть выражены количественно, то их уровень может быть соотнесен со значением показателя, принятого за базу P_{i0} .

Когда увеличение абсолютного значения единичного показателя качества приводит к улучшению качества, уровень показателя выражают отношением:

$$Y_i = \frac{P_i}{P_{i0}}, \quad (21)$$

В случае, когда увеличение приводит к ухудшению качества оборудования, уровень выражают отношением:

$$Y_i = \frac{P_{i0}}{P_i}, \quad (22)$$

Таким образом, улучшение качества всегда приводит к росту уровня качества по рассматриваемому показателю» [52].

Вторым шагом сравнения технологий является графическое изображение диаграммы, связывающей все данные в общую фигуру. Из выбранного центра диаграммы проводится некоторое количество лучей, равное количеству выбранных характеристик. Данные лучи являются шкалами сравнения, по которым будет создаваться диаграмма. Далее на каждом луче указываются точки, обозначающие значение определенной характеристики для каждой системы. После этого точки характеристик каждой системы объединяются, образуя многоугольники. Сравнив эти многоугольники между собой можно визуальным образом понять, какой из вариантов системы является наиболее выгодным. Обычно избирается тот вариант, многоугольник которого имеет наибольшую площадь, а также стремится к

более правильной форме фигуры. Изображение диаграммы может быть выполнено вручную или с помощью программ по работе с чертежами, такими как Компас 3D, Simens NX, Catia и другие.

«Для увеличения достоверности анализа проводится сравнение экспертным методом. Метод заключается в присуждении коэффициента важности для каждой из характеристик системы с целью увеличить или уменьшить влияние тех или иных характеристик на общий результат анализа. Ответственность за присуждение коэффициентов возлагает сам исполнитель проекта, при необходимости консультируясь с заказчиком или внешними экспертами. При выборе оборудования данным методом экспертом на основе собственного опыта определяется важность каждого параметра в паспорте оборудования C_i с учетом конкретных требований, габаритов, особенностей конструкции т.д.

Уровень показателя качества по каждому параметру с учетом его весомости определяется выражением:

$$P_i = \frac{C_i \cdot Y_i}{100}, \quad (23)$$

Лучшим признается то оборудование, которое наберет наибольшую сумму оценок. $P_{\Sigma_i} = \sum_{i=1}^n \frac{C_i \cdot Y_i}{100}$

Утвержденная форма протокола для типового анализа оборудования с привлечением квалифицированных экспертов размещена в таблице 11» [24].

Таблица 11 – Экспертный анализ

Выбранные характеристики, единицы измерения	С, %	Р ₁₀ (Пневматическая система)	Оценочные значения показателей по оборудованию модельного ряда								
			Гидравлическая система			Электрическая система			Механическая система		
			Р ₁	У ₁	П ₁	Р ₁	У ₁	П ₁	Р ₁	У ₁	П ₁
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1 Ход Поршня	10	25	30	1,2	0,12	100	0,25	0,03	30	0,83	0,08
2 Прилагаемое усилие	15	240	300	1,25	0,19	200	1,2	0,18	30	0,125	0,02
3 Скорость переключения	10	0,3	0,2	1,5	0,15	0,5	0,6	0,06	0,7	0,42	0,04
4 Стоимость	25	60	200	0,3	0,08	100	0,6	0,15	3	0,05	0,01
5 Масса	25	2,5	6	0,41	0,10	2,5	1	0,25	1,5	1,6	0,4
6 Легкость реализации	15	3	1	0,33	0,04	5	0,6	0,09	8	2,6	0,39
Результат	100	1	-	-	0,68	-	-	0,51			0,94

В результате анализа лидирующую позицию заняла пневматическая система управления, показав общие сбалансированные значения всех характеристик.

Выводы по разделу

Определены ключевые параметры автомобиля, включая колею, базу и распределение массы, что позволило заложить устойчивую и управляемую базу для дальнейшего проектирования трансмиссии. Также проведён анализ существующих решений на рынке и выбран наиболее выгодный прототип системы.

3 Проектирование и расчет

3.1 Определение исходных данных

Проектирование системы управления трансмиссией начинается с понимания всех исходных данных, для чего определяются основные технические требования, а также ожидания. Так как система такого типа проектируется первый раз за всю историю команды, требуется предусмотреть все возможные ошибки и отказы систем в процессе эксплуатации:

1. Система должна обеспечивать повышение и понижение передачи, а также включение нейтральной передачи без внешнего вмешательства человека на пневматический актуатор.

2. Система питания системы должна обеспечивать систему сжатым воздухом на протяжении гонки на выносливость с условным запасом на утечки системы, непредвиденные переключения и сохранением общего давления системы.

3. Управление системой должно производиться из кабины пилота с помощью кнопок или переключателей, расположенных на рулевом колесе автомобиля, для оперативной работы водителя и минимизации времени переключения.

4. Усилие пневматического цилиндра должно иметь запас для исключения ошибок при переключении передач под нагрузкой. Ход цилиндра должен обеспечивать надежное включение передачи в условиях высокого уровня вибрации.

5. Система должна иметь регулятор давления для оперативной настройки, целью которой может являться увеличение производительности системы или экономия сжатого газа.

3.2 Проектирование конструкции

Проектирование пневматической системы основывается на вводных данных актуатора, требований к его перемещению и передаточного числа трансмиссии. Главная цель – достижение надежной автоматизации при минимальной массе конструкции. Особое внимание уделяется надежности соединений, ремонтпригодности и компактности конструкции.

Пневматическая система переключения передач состоит из нескольких основных частей. Каждая часть выполняет свою функцию и может быть реализована несколькими методами:

1) Цилиндр

Пневматический цилиндр состоит из корпуса с двумя крышками, поршня и одного или нескольких штоков. При попадании воздуха в один из каналов цилиндра, поршень под давлением начинает двигаться вдоль корпуса, перемещая груз, прикрепленный к штоку.

Вводные данные для расчета пневматического цилиндра:

- усилие на рычаге переключения передач – 120 Н,
- линейный ход рычага переключения передач (из нейтрального в конечное положение) – 10 мм.

Для расчета усилия, развиваемого цилиндром, требуется воспользоваться формулами:

$$F_F = \frac{\pi D^2}{4} P \eta_{9,81}, \quad (24)$$

$$F_B = \frac{\pi(D^2 - d^2)}{4} P \eta_{9,81}, \quad (25)$$

Где:

F_F – усилие при прямом ходе цилиндра (Н);

F_B – усилие при обратном ходе цилиндра (Н);

- D – диаметр цилиндра (см);
- d – диаметр штока (см);
- η – КПД (обычно принимают за 0.9);
- P – давление в системе (бар).

Подбирая пневмоцилиндр необходимо учитывать конструктивный запас усилия 1.5-2 раза, а также не использовать для расчета минимального усилия максимально допустимое давление в системе. С учетом ограничения максимального давления регламентом и требований производителя, было выбрано давление в системе равным 3 бар (0.3 МПа). Получив расчетный диаметр цилиндра, сравниваем его с существующей таблицей стандартных размеров.

Таблица 11 – Стандартные размеры пневмоцилиндров

Расчетный диаметр мм	Диаметр по ISO 21287
29,5	32

Результатом расчета и сравнения полученных характеристик с существующими решениями был выбран пневматический цилиндр с диаметром поршня 32 мм и ходом поршня 25 мм.

2) Распределитель

Распределителем называют клапан, отвечающий за подачу воздуха в цилиндр. Для корректного выполнения всех заданных требований была выбрана система, состоящая из трех трехлинейных двухпозиционных распределителей, при которой каждый распределитель отвечает выполнение определенной команды.

3) Источник питания

Источником питания пневматической системы является баллон высокого давления, который применяется для питания пневматического оружия для пейнтбола и страйкбола.

Для подбора баллона воздуха нам требуется знать расход пневмоцилиндра на одно действие и количество переключений, которое планируется совершить без перезарядки. Для расхода цилиндра нам требуется знать его основные параметры: диаметр поршня, его ход и рабочее давление системы, после чего воспользоваться уравнением Менделеева-Клайперона для поиска количества газа:

$$PV = \nu RT, \quad (25)$$

где: P – давление в системе;

V – объем;

ν – количество молей газа;

R – универсальная газовая постоянная;

T – температура.

После нахождения количества газа, необходимо умножить его на количество переключений и подставить в уравнение для поиска объема баллона высокого давления. Таким образом можно получить формулу:

$$P_1 V_1 = \frac{P_2 V_2}{RT} RTN, \quad (26)$$

После сокращения получаем:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 N, \quad (27)$$

где P_1 – давление в баллоне;

V_1 – объем баллона;

P_2 – рабочее давление системы;

V_2 – Объем рабочей полости пневмоцилиндра;

N – количество повторений.

Расход пневмоцилиндра также можно узнать на сайте производителя. Значение расхода пневмоцилиндра указано в Нормальных Литрах, то есть в объеме воздуха при нормальных условиях.

Узнав количество воздуха, требуемое для одного переключения, умножаем это число на количество переключений и подставляем значение в ту же формулу:

$$P_1 V_1 = P_2 V_2 N, \quad (27)$$

После расчета и анализа рынка был выбран композитный пневматический баллон объемом 0.4 литра и максимальным давлением 0,3МПа.

4) Дроссель

Дроссель – это стационарный, настраиваемый клапан, который устанавливается между распределителем и цилиндром с целью точной настройки скорости выдвижения штока. Целью установки дросселя является изменение скорости линии и выравнивание потока воздуха, что делает движение цилиндра более стабильным. В системе дроссель используется для включения нейтральной передачи.

5) Регулятор давления

Регулятор давления устанавливается на резервуаре с воздухом, обеспечивая настраиваемое давление во всей системе для обеспечения безопасного давления для инструмента или оборудования, подключенного к источнику питания. Технический регламент требует наличия регулятора давления на баллоне со сжатым воздухом для создания выходного давления 10 бар или 0,01МПа. Для реализации понижения давления с 0,3 до 0,01 МПа, на баллоне расположены 3 последовательных понижающих регулятора.

6) Трубопровод

Трубопровод пневматических систем низкого давления выполняется с помощью трубок из разных материалов пластика. Состав трубки зависит от температурного режима системы, от агрессивности среды, от проходящего через трубопровод газа и требований к токсичности материала в случае использования пневматических систем в здравоохранении и пищевой промышленности.

Ориентируясь на условия высоких температур во время соревнований и низких температур во время хранения был выбран трубопровод из полиамида.

7) Логические элементы

Логические элементы представляют собой специальные блоки, распределяющие воздушные потоки, ориентируясь на различные входные данные. Различают логические элементы ДА, НЕТ, И, ИЛИ. Для данной системы был выбран логический элемент ИЛИ, который осуществляет распределение воздушных потоков от распределителя понижения передачи и распределителя включения нейтральной передачи к пневматическому цилиндру

Выводы по разделу

На основе результатов расчетов и поиска существующих комплектующих была достигнута работоспособность конструкции в различных условиях работы. Учитывалось как количество переключений во время заезда, так и температурный режим при эксплуатации и хранении.

4 Безопасность и экологичность технического объекта

«Процесс установки пневматической системы представляет опасность для изготовителя, поэтому необходимо соблюдать положения по охране труда, которые обеспечивают безопасность работников. Документация разрабатывается на основе международного опыта автомобилестроительных предприятий, при этом учитываются требования законодательства Российской Федерации. Каждое предприятие обеспечено инструкционными материалами о правилах безопасности, а каждый сотрудник проходит обучение и инструктаж, это способствует обеспечению безопасности труда для персонала на территории предприятия» [11].

Для осуществления установки пневматической системы необходимы электромонтажные, слесарные, сварочные и сборочные работы. Каждый вид работы содержит опасные и вредные производственные факторы. Регламент по технике безопасности требует отдельные рабочие помещения и ОВПФ под каждый вид работы.

ОВПФ электромонтажных работ указаны в таблице 13.

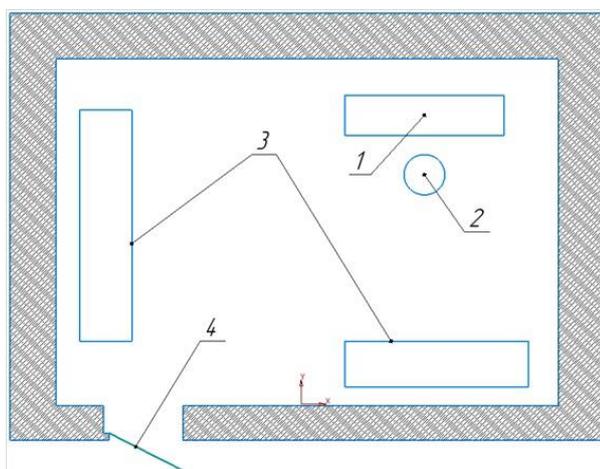
Таблица 13 – ОВПФ электромонтажных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Электромонтажные работы	-Сварка аккумулятора; -подключение электрокомпонентов	Диэлектрический набор инструментов, электроизмерительные приборы, точечный сварочный аппарат; оснастка для сварки	Физические: электрические удары, физические перегрузки, ожог, электромагнитные излучения, движущие механизмы

«Для обеспечения безопасности в данном рабочем процессе необходимо соблюдать следующие технические требования:

- поддержание чистоты и порядка на рабочем месте, избегание масла, деталей и прочих отходов под ногами,
- обязательное отключение напряжения в сети перед ремонтом электрооборудования и установка плаката "Не включать. Работают люди,
- использование защитных очков и диэлектрических перчаток при сварке или пайке,
- проверка надежного крепления и заземления электрооборудования,
- производить разборку и сборку узлов электрооборудования на специализированных рабочих столах или стендах,
- проводить регулярный инструктаж по технике безопасности,
- прохождение медицинского обследования.» [3].

Рабочее место для работы с электрооборудованием изображено на рисунке 14.



1 – рабочий стол; 2 – стул; 3 – шкаф для инструментов; 4 – дверной проем

Рисунок 14 – Рабочее место электротехника

«Основными задачами электрика являются:

- производить маркировку готовых изделий, добавляя дополнительные комментарии или информацию,

- производить пайку аккумуляторов,
- проводить проверку точности установки компонентов,
- осуществлять установку защитных компонентов в процессе работы,
- соблюдать технику безопасности,
- проводить техническое обслуживание и ремонт аккумуляторов при необходимости.

ОВПФ слесарных работ указаны в таблице 14» [1].

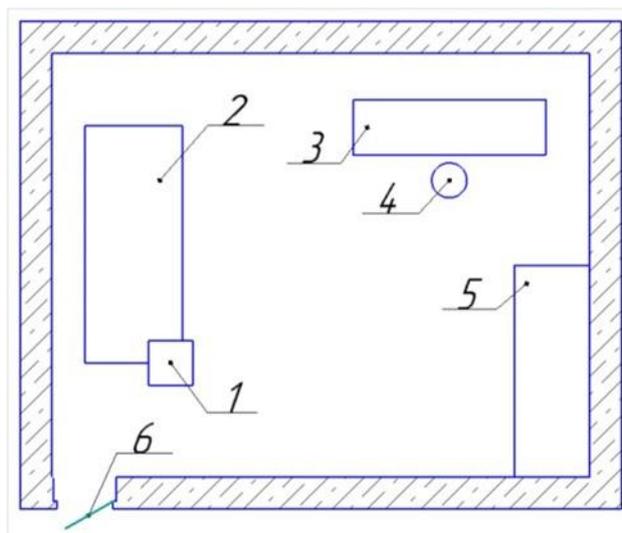
Таблица 14 – ОВПФ слесарных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
1	2	3	4
Слесарные работы	- обработка металла; - резка и гибка металла; - сверление; - резьбонарезание; - клепание	-напильники, шуруповерт, заклепочник, молоток, набор метчиков и плашек, угловая шлифовальная машина, штангенциркуль	Физические: вращающиеся части, острые кромки, повышенный уровень шумности, абразивная пыль, локальная вибрация

«Для данного рабочего помещения требования техника безопасности:

- проверять состояния и исправность слесарного оборудования и инструментов, а также их правильное использование согласно инструкциям производителя;
- соблюдать правила использования СИЗ;
- соблюдать чистоту на рабочем месте;
- использовать только исправную технику и инструменты, в соответствии с инструкцией предприятия;
- соблюдать технику безопасности и правил охраны труда;

Рабочее место для слесарных работ изображено на рисунке 15» [3].



1 – слесарные тиски; 2 – верстак; 3 – рабочий стол; 4 – стул; 5 – шкаф для инструментов;
6 – дверной проем

Рисунок 15 – Рабочее место для слесарных работ

«Основными задачами слесаря являются:

- выполнение резки металла,
- соблюдение техники безопасности,
- осуществление профилактических проверок оборудования, проверка качества инструмента,
- систематическая проверка знаний по технике безопасности и охране труда,
- регулярная проверка наличия необходимых материалов,
- по завершению работ требуется выполнить уборку.

ОВПФ сварочных работ представлен в таблице 15» [1].

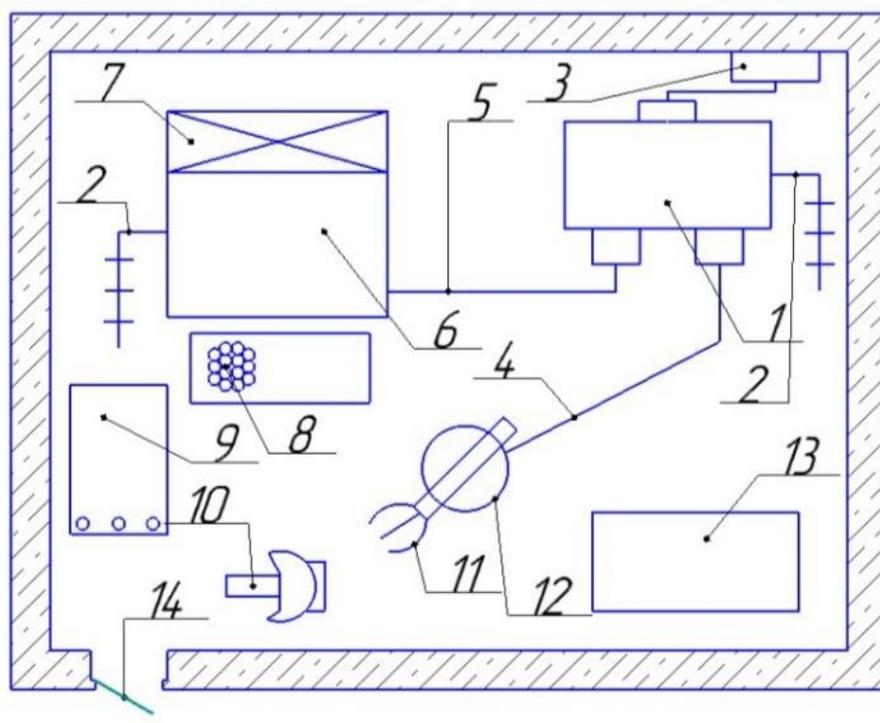
Таблица 15 – ОВПФ сварочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
Сварочные работы	Сварка деталей	Сварочная оснастка, ручной инструмент, зажимы и струбцины, магнитные угольники для сварки	Физические: статическая нагрузка на верхние конечности, опасность ожогов, электромагнитные поля, острые кромки, опасность поражения электрическим током, взрывоопасность, повышенный уровень шума, излишняя яркость сварочной дуги Химические: -аргон, вольфрам, хлориды железа, натрия и калия

«Для данного рабочего помещения действуют следующие требования безопасности:

- перед началом работы требуется выполнить подготовку оборудования, проверить его работоспособность и состояние инструментов,
- необходимо проверять работоспособность оборудования и инструментов,
- соблюдение правил безопасности и охраны труда,
- требуется использовать средства индивидуальной защиты и защитное снаряжение во время работы,
- необходимость регулярных проверок состояния здоровья,
- соблюдать внутренние правила и положения на предприятии» [3].

На рисунке 16 – изображено рабочее место сварщика.



1 – сварочный аппарат; 2 – заземление; 3 – силовой провод питания; 4 – шланг для подачи проволоки и газа; 5 – обратный токоподводящий провод; 6 – верстак; 7 – вентиляция; 8 – резиновая изоляция рабочего; 9 – проволока; 10 – щиток; 11 – пистолет для подачи проволоки и газа; 12 – стул; 13 – ящик для отходов; 14 – дверной проем

Рисунок 16 – Рабочее место для сборочных работ

«Основные задачи сварщика:

- сваривать конструкции и элементы в соответствии с предписаниями,
- выполнять прихватки деталей,
- выполнять постобработку сварной детали,
- выполнять проверку наличия сварочных расходных материалов,
- осуществлять контроль качества сварочного шва и его проникание в материал после сварки, специальными инструментами.,
- соблюдать технику безопасности.

ОВПФ сборочных работ указаны в таблице 16.» [2].

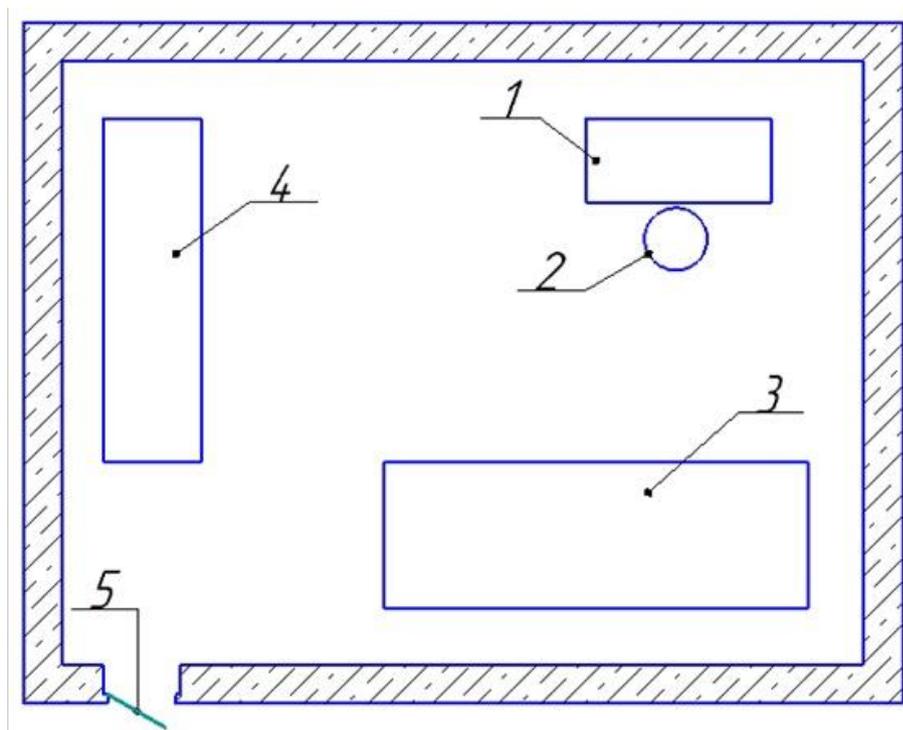
Таблица 16 – ОВПФ сборочных работ

Направление работы	Сущность работы	Список необходимых инструментов	ОВПФ
Сборочные работы	Сборка узлов с упором на чертежи и 3D-модели	Тиски, ручные инструменты (напильники, молоток, ключи), измерительные инструменты (штангенциркуль, линейка, рулетка), электроинструменты	Физические: движущие механизмы, изделия, части разрушившего изделия, повышенный уровень шума, абразивная пыль, воздействие электрического тока, острые кромки.

«Для данного рабочего помещения действуют следующие требования безопасности:

- ознакомление с инструктажами по технике безопасности;
- дисциплина на рабочем месте;
- Использование СИЗ;
- соблюдение правил безопасности и охраны труда;
- необходимо проверять работоспособность оборудования и инструментов;
- регулярная проверка наличия необходимых компонентов и заготовок» [3].

Рабочее место для сборочных работ представлено на рисунке 17.



1 – рабочее место; 2 – стул; 3 – верстак; 4 – шкаф с инструментами;
5 – дверной проем

Рисунок 17 – Рабочее место для сборочных работ

«Основные задачи сборщика включают в себя:

- сборка деталей строго по чертежу, 3d - модели;
- составление необходимой документации, требуемой для последующей работы с данным узлом;
- проверка точности монтажа деталей и узлов с использованием измерительных инструментов;

Выводы по разделу

Использование мероприятий безопасности на практике снижает риск возникновения травм и вредных воздействий на здоровье сотрудников, обеспечивая более высокий уровень защиты от различных опасностей при осуществлении трудовых обязанностей.» [1].

Заключение

В ходе выполнения данной выпускной квалификационной работы была разработана пневматическая система переключения передач для гоночного болида класса Formula Student, представляющая собой современное и технологичное решение, ориентированное на повышение надежности и скорости функционирования трансмиссии.

На первом этапе проектирования был проведён всесторонний анализ конструктивных решений, применяемых в аналогичных системах другими командами, участвующими в международных соревнованиях Formula Student. Это включало изучение как зарубежных, так и отечественных реализаций, что позволило выделить ключевые преимущества и недостатки различных технических решений. На основании полученной информации был сформирован перечень технических требований, в полной мере соответствующих задачам команды и особенностям конструкции болида.

Особое внимание в работе уделено соответствию пневматической системы актуальному немецкому регламенту Formula Student 2025, который содержит строгие требования к безопасности, эргономике, массо-габаритным характеристикам и надежности узлов. Такой подход позволил обеспечить не только высокие эксплуатационные характеристики системы, но и полное соответствие техническим требованиям, предъявляемым к автомобилям-участникам соревнований.

В техническом плане разработанная система использует сжатый воздух в качестве рабочего тела, а в качестве исполнительного механизма применён пневматический цилиндр, интегрированный в конструкцию коробки передач. Применение пневматического привода позволило существенно повысить скорость переключения передач и сократить временные потери при разгоне, что напрямую влияет на результат соревнований. Кроме того, была обеспечена компактность установки и снижена масса системы за счёт оптимального

распределения нагрузок и применения облегчённых материалов при сохранении необходимого уровня прочности.

Также в рамках работы были выполнены расчёты, моделирование и 3D-проектирование компонентов системы, что позволило провести предварительную верификацию конструктивных решений ещё на этапе цифрового проектирования. Изготовление и сборка опытного образца системы осуществлялись с использованием современного оборудования и технологий, что обеспечило высокое качество конечного изделия.

Разработанная пневматическая система была установлена на гоночный болид команды и прошла первичные стендовые и полевые испытания. По результатам тестирования подтверждена её работоспособность, надёжность и готовность к применению в условиях реальных соревнований. Система продемонстрировала стабильное функционирование и высокий отклик при переключении передач, что позволяет рассчитывать на её успешное использование в рамках ближайших этапов Formula Student Russia.

Таким образом, цели и задачи, поставленные на этапе начала выполнения выпускной квалификационной работы, были успешно достигнуты. Полученные в ходе работы результаты могут быть использованы в дальнейших этапах разработки болида, а также послужить основой для последующих усовершенствований и внедрения более сложных автоматизированных систем управления трансмиссией.

Список используемой литературы и используемых источников

1. Анурьев В. И. Справочник конструктора-машиностроителя: в 3-х т. – Т.3. – 8-е изд., перераб. и доп. / Под ред. И.Н. Жестоковой. – М.: Машиностроение, 2001. – 864 с.
2. Горбацевич А. Ф., Шкред В. А. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие для вузов. – М.: ООО ИД «Альянс», 2007. – 256 с.
3. Голубина С. А., Карпов М. А., Черенков А. Г. АНАЛИЗ НЕСУЩИХ СИСТЕМ СОВРЕМЕННЫХ ЛЕГКОВЫХ АВТОМОБИЛЕЙ // Архивариус. 2021. №4 (58). 3 с.
4. Головин Д. В. Анализ и определение геометрических характеристик несущей системы болида класса «Формула Студент» // Вестник науки и образования. 2015. №7 (9). 5 с.
5. Головин Д. В. Оценка погрешностей при производстве рамы болида "Формула Студент" // МНИЖ. 2016. №8-3 (50). 3 с.
6. Головин Д. В. Прочностной анализ рамы болида «Формула Студент» ПНИПУ // МНИЖ. 2015. №9-2 (40). 4 с.
7. ГОСТ 12.4.035-2014. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты глаз и лица.
8. ГОСТ 12.4.041-2011. ССБТ. Средства индивидуальной защиты органов дыхания.
9. ДСТУ ISO 12100:2014. Безопасность машин. Общие принципы проектирования. Оценка и снижение рисков.
10. Иванов А. С., Давыденко П. А., Шамов Н. П. Курсовое проектирование по технологии машиностроения: учебное пособие. – М.: ИЦ РИОР: НИЦ ИНФРА-М, 2014. – 276 с.
11. Капрова В. Г. Учебно-методическое пособие к выполнению курсовой работы по дисциплине «Организация производства» для студентов

специальности 190201 – «Автомобиле- и тракторостроение» всех форм обучения. – Тольятти: ТГУ, 2016. – 45 с.

12. Регламент Formula Student Russia 2025 [Электронный ресурс] URL: <https://fsrussia.ru> (дата обращения: 03.04.2025г.).

13. Резник Я. Е. Прочностной расчет сварных рам: учеб. пособие. М. : Машиностроение, 2010. ... с.

14. Сапон В. М. ОПТИМИЗАЦИЯ ПРОСТРАНСТВЕННОЙ ТРУБЧАТОЙ РАМЫ БОЛИДА КЛАССА "ФОРМУЛА СТУДЕНТ" // E-Scio. 2020. №9 (48). 14 с.

15. Чернов С. А. Результаты численного анализа вариантов моделирования узлов рамы автомобиля // Вестник УлГТУ. 2014. №1 (65). 4 с.

16. Abishev K. K., Mukanov R. B., Mazdubay A. V. STRENGTH CALCULATION OF COMBINED TOOL HEAD IN APM FEM // Наука и техника Казахстана. 2022. №3. 12 p.

17. ANSYS Theory Manual. – ANSYS Inc., 2023.

18. FS Rules 2025, v1.1 – Formula Student Germany [Электронный ресурс] URL: <https://fsg.one> (дата обращения: 15.04.2025г.).

19. Pukhkal V.A., Mottaeva A.B. FEM MODELING OF EXTERNAL WALLS MADE OF AUTOCLAVED AERATED CONCRETE BLOCKS // Magazine of Civil Engineering. 2018. №5 (81). 10 p.

20. Valiullin D., Chizhov S. Bolted connections stiffness of steel trusses for bridge superstructures // Magazine of Civil Engineering. 2022. №6. 10 p.